

令和 2 年 6 月 30 日現在

機関番号：32645

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2016～2019

課題番号：16H02899

研究課題名（和文）超音波・CTを融合した3次元画像処理に基づく術中プランニング・ナビゲーション

研究課題名（英文）Intraoperative planning and navigation based on three-dimensional image processing combining ultrasound and CT

研究代表者

下田 貢（Shimoda, Mitsugi）

東京医科大学・医学部・准教授

研究者番号：90332999

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,600,000円

研究成果の概要（和文）：肝臓手術で従来使用する2D超音波画像が3D画像化可能であるか、開発に取り組んだ。高精度な磁気センサーからの超音波プローブの位置・姿勢情報と超音波画像からの高精度リアルタイム3次元画像技術の開発。超音波3次元画像からの高精度な肝臓の血管・腫瘍のリアルタイム自動認識技術の開発を行った。位置・姿勢センサーとして高精度なセンサーである磁気センサー（電磁界式計測システムAURORA）を用い、超音波プローブに磁気センサーを組み込み、まず、体表から肝臓の超音波画像を毎秒30枚程度の間隔で取得し3D画像を構築した。磁気センサーを用いることで、超音波3D画像の作製は可能と考えられた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

手術中は、術者は、肝臓の超音波画像と、3次元コンピュータグラフィックによる術前プランニング画像を見比べながら血管・腫瘍・切断領域の同定を行っている。この超音波画像が2次元であることや、肝臓の形状や向きが手術中に変わることなどから、術前シミュレーション結果と対応付けるのが容易ではないため、術者に高いスキルが要求され、さらに、術前シミュレーションソフトウェアを導入しても、手術時間がほとんど短縮されない要因となっている。今回の研究により超音波3D画像の構築が可能となる事が示され、術前3D CT画像との整合性がより明確となり、今後、最適な手術を行うことが可能となる事が示された。

研究成果の概要（英文）：We worked on the development of whether the 2D ultrasound images that were conventionally used in liver surgery could be converted into 3D images.

(1) Development of high-precision real-time 3D image technology based on ultrasonic probe position/orientation information and ultrasonic images from a highly accurate magnetic sensor. (2) We have developed a highly accurate real-time automatic recognition technology for blood vessels and tumors of the liver from ultrasonic 3D images. A high-precision magnetic sensor (electromagnetic field type measurement system AURORA) is used as a position/orientation sensor, and the magnetic sensor is incorporated into the ultrasonic probe. First, ultrasonic images of the liver are taken from the body surface at intervals of about 30 sheets per second. And acquired a 3D image. It was considered possible to create an ultrasonic 3D image by using a magnetic sensor.

研究分野：肝胆膵外科

キーワード：肝臓切除 3Dシミュレーション 超音波

様式 C-19, F-19-1, Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

肝臓外科手術においては、CT画像から3次元画像を構築し、その上で切除領域をシミュレーションすることが一般的になってきている。このようなシミュレーション技術を実際の手術に適用するうちに、従来のシステムには、以下のような課題があることを見出した。

- 1) **超音波2次元画像と術前プランニング3次元画像の対応付けの難しさ:** 手術中は、術者は、肝臓の超音波画像と、3次元コンピュータグラフィックによる術前プランニング画像を見比べながら血管・腫瘍・切断領域の同定を行っている。この超音波画像が2次元であることや、肝臓の形状や向きが手術中に変わることなどから、術前シミュレーション結果と対応付けるのが容易ではないため、術者に高いスキルが要求され、さらに、術前シミュレーションソフトウェアを導入しても、手術時間がほとんど短縮されない要因となっている。
- 2) **術中の肝臓の移動・変形に対応できるナビゲーションシステムの必要性:** 最新の超音波装置では、術前プランニング結果と対応付けをする機器があるが、肝臓の位置と術前プランニング結果の対応を手動で設定せねばならず、さらに、肝臓を移動・変形すると、再度設定しなおさなければならず実用性が低い。同様に、申請者等が導入しているヘッドマウントディスプレイでも、現状、術前プランニングの表示結果は、肝臓の移動・変形には対応せず、術者が自ら表示画像のサイズ、向きを調整しなければいけない問題がある。
- 3) **リアルタイムプランニングの重要性:** CT画像撮影時の病状と、手術時の病状が異なっていることがある(例:肝硬変が進行しているなど)。その場合、術前プランニング通りに大きく切除できなくなり、結果、ガンの再発率が高まる。また、開腹後に肝臓表面に超音波を当てた場合には、CT画像よりも、より詳細な血管等が見えることがある。その場合、より小さい切除範囲で切除を行える可能性があることを見出している。そこで、手術時に、術中の超音波画像から肝臓の3次元情報を取得し、患者の「今」の病状に基づきプランニングできれば、患者に病状に最適な手術を行うことが可能となる。

2. 研究の目的

肝臓外科手術では、3次元画像を用いた術前プランニングが一般的になってきている。しかしながら、術中においては、術者が、超音波2D画像を見ながら、目視で切除領域を同定しているため、術前プランニング結果が手術時間の効率化・高安全化に必ずしも役立っていない。本研究では、超音波画像に着目して、以下の3次元画像処理技術を確立することを目的とする。

- ① 超音波画像のみから、肝臓と血管の高精度3次元画像をリアルタイムで構成する技術
- ② 超音波3次元画像と、CT/MRIからの3次元画像をリアルタイムで自動対応付けする技術
- ③ 手術中の肝臓の移動や変形に対応して、切除領域を自動トラッキングし、術者に分かりやすく提示できるナビゲーションシステム

本研究が成功すれば、術前プランニング結果を、手術中に効率よく活用することが可能となる。

3. 研究の方法

本研究計画では、センサーからの位置・姿勢情報と、超音波装置からの撮影画像をもとに、肝臓の3次元画像を構築し、それに基づき術中にリアルタイムプランニングを行う技術、さらに、術野に3次元情報を提示するAR(仮想現実技術)を開発する。進め方の概略を以下に示す。

全体計画は、「超音波3次元画像処理システム」と、「3次元画像情報提示システム」からなる。
[超音波次元画像処理システム]

超音波装置と高精度磁気センサーを用いた超音波プローブの位置・姿勢情報からリアルタイムに肝臓内部の3次元画像を構築し、さらにプランニングを行うシステムを開発する。手術中に肝臓を移動・変形しても、超音波プローブで肝臓表面を手持ちでスキャンすることにより、3次元情報が取得でき、それと術前プランニング情報を位置合わせできるため、術前プランニング情報を術中に有効に活用できる。重要な研究開発のポイントとして

- ① 高精度な画像処理アルゴリズム
- ② リアルタイムで3次元画像処理を実現する並列処理アクセラレータ開発

[3次元画像情報提示システム]

肝臓血管・腫瘍・切断面などの3次元プランニング情報を、シースルー型ヘッドマウントディスプレイを用いて術者の視野に直接提示できるシステムを開発する。術者の視野に見えている映像と、コンピュータ画像をリアルタイムで位置合わせするために重要なポイントは以下のようになる。

- ① 情報提示用のヘッドマウントディスプレイ、位置・姿勢センサー、小型・高速・低消費電力な画像処理ハードウェアを統合したプラットフォーム開発
- ② 術中の肝臓の変形に対応できる画像認識技術

4. 研究成果

(1)術中超音波画像からの3次元再構成システムの開発^{1),2)}

図1に示すように、超音波画像から肝臓の3次元画像を取得するためのシステムを開発した。本システムでは、超音波エコーのプローブに小型の磁気タグ(長さ2cm, 太さ2mm)を取り付け、50cm × 50cm × 50cm程度の3次元空間に磁場を生成する装置を用いて、磁場中での磁気タグすなわち超音波プローブの位置を1mm以内、姿勢を1度以内で計測できるシステムを構成した。このシステムでは1秒間に40個程度の位置・姿勢情報を取得できる。また、超音波エコー装置の出力画像を高解像度なデジタル画像で出力し、その画像を前述の磁気計測装置から得られるプローブの位置・姿勢情報と共にPCに保存できる。画像としては、2次元の超音波エコー画像を用いる。3次元でスキャン可能なプローブも存在するが、2次元のプローブと比較して、プローブのサイズが大型になり、解像度も低くなるというデメリットがあるため、本システムでは2次元の画像を用いている。

図2に示すように、磁気式3次元超音波画像取得装置からの超音波スライス画像から、3次元を再構成するための手法を考案した。3次元空間のボクセルに計測された画像を高精度にVotingすることアルゴリズムを考案することにより、肝臓の高精度な3次元画像を構成できることを明らかにした。さらに、その3次元画像を用いて肝臓血管を抽出するアルゴリズムを考案した。

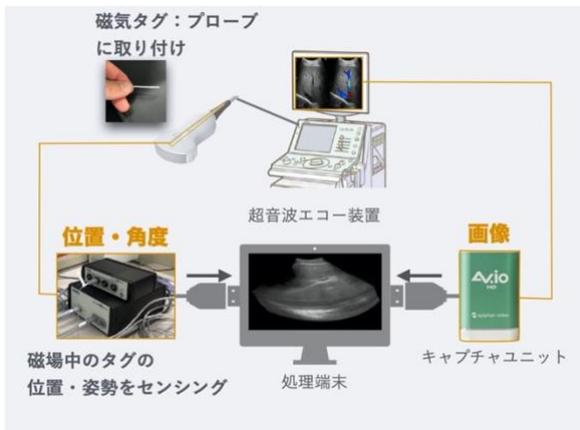


図1：磁気式3次元超音波画像取得装置

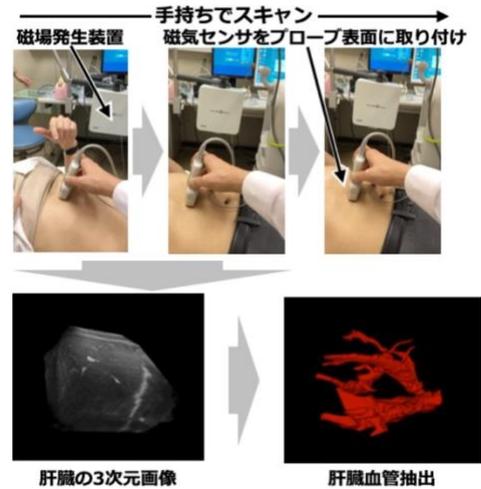


図2：3D超音波画像からの血管抽出

(2)術前プランニング画像と術中超音波3D画像の対応付け技術

図3のように、術前の3DCT画像を用いて行われたプランニング結果と、手術中に得られた3次元超音波画像の対応付け、具体的には、肝臓中のランドマークとして重要となる門脈血管に着目して、その対応付けを行う手法を行う手法を開発した。この技術を用いることにより、手術中に、切除領域に従って術者をナビゲートすることが可能となる。さらに、手術中に得られた超音波画像をと術前に得られた高精度なCT画像を融合することにより、術中に信頼性の高い肝臓の3次元画像を構成することが可能となり、手術中にリアルタイムプランニングを行うための情報となる。

術前のプランニング結果と、手術中に得られた3次元超音波画像の対応付けにおいては、変形した血管の間での対応付けをすることが難しい問題となる。そこで、血管の変形を考慮した非剛体レジストレーションに基づく対応付け手法を考案した。図4にその結果を示す。緑色の点群は術前の3DCTから抽出された点群であり、紫色の点群は超音波画像から抽出された点群である。非剛体レジストレーションにより、形状の変形を考慮して対応付けが行われていることがわかる。

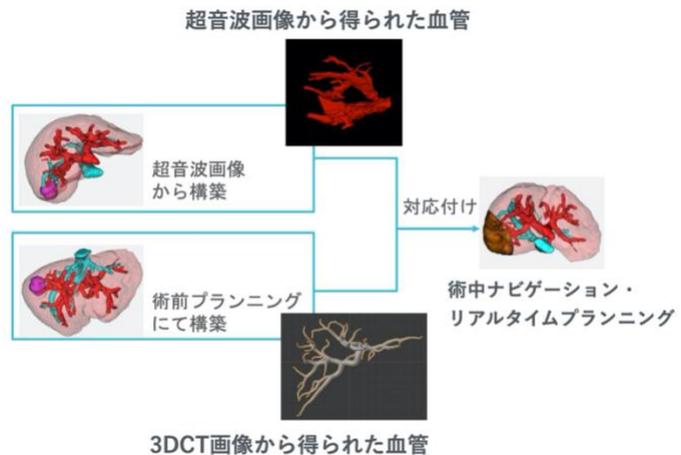


図3：術前プランニング結果と術中超音波画像の対応付

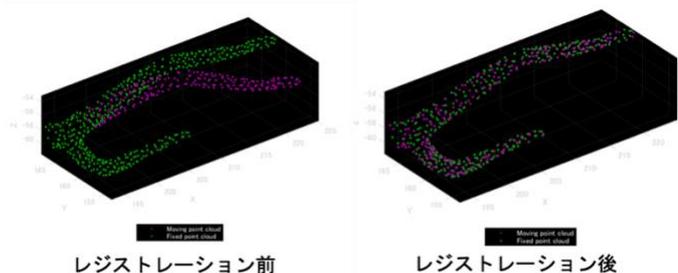


図4：術前プランニング結果と術中超音波画像の対応付

(3)リアルタイムプランニングを目的とした最適切除領域推定システムの開発^{3), 4), 5)}

術前の3DCT画像または、術中の3D超音波画像から、最適な切除領域を高速に求める手法を開発した。ここで「最適」な切除領域とは、腫瘍の再発率を抑えつつ、患者の負担を最小にすべく切除領域を最小にするような切除領域である。図5に示すように、肝臓の門脈の構造を考慮した系統的切除を対象として、腫瘍の肝臓実質の影響の大きさを定量化できる「腫瘍支配率」という指標を提案し、切除領域を推定する問題を、切除体積制約下で「腫瘍支配率」を最大化する数理的最適化問題として定式化した。その結果、ベテラン医師の計画した切除領域を自動的に推定できることを実証している。また、肝臓表面に近い場所にある腫瘍に対しては、従来、部分切除と呼ばれる、楕円曲面状の形状の領域でくり抜く手術が行われる。しかしながら、腫瘍の周囲のマージンは医師の経験に基づいて決定されていた。そこで、提案のシステムでは、系統的切除領域を基として、部分切除のための楕円曲面を切除体積を最小にするように決定する手法を提案した。最適な楕円曲面の位置・姿勢を求めるには、全探索では10時間以上の計算時間がかかる。そこで、楕円曲面の形状決定問題を、線形計画問題として定式化することで、準最適解を8分程度で求めることを可能としている。また、上記の両手法とも、マルチコアでの並列処理を導入することで、利用するコア数に比例した速度向上を達成している。

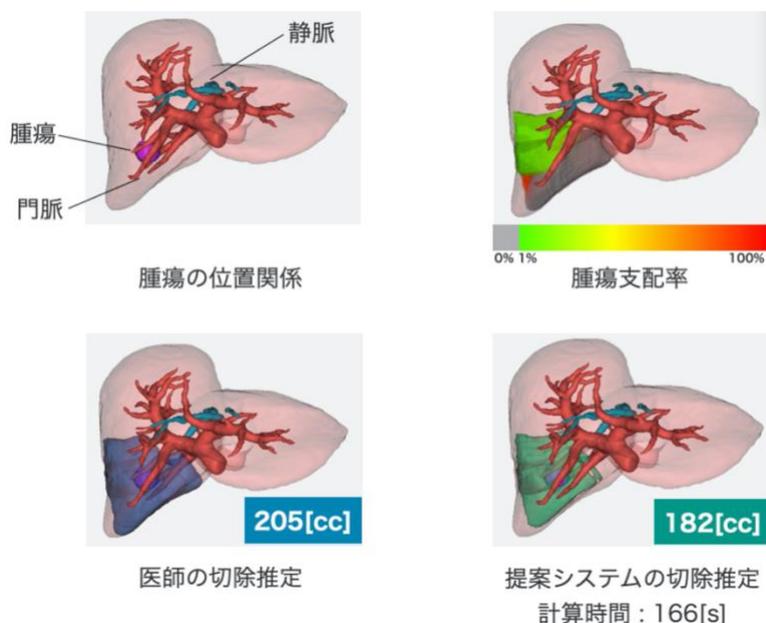


図5：系統的切除のための最適切除領域推定

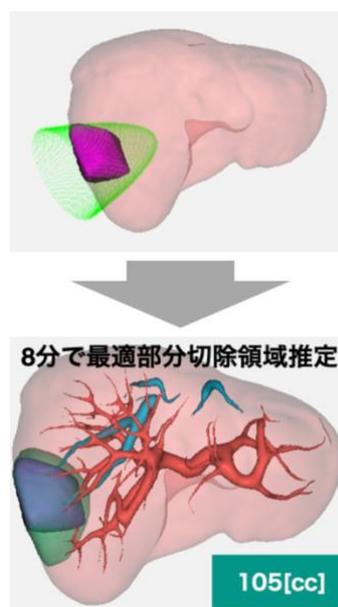


図6：部分切除のための最適切除領域推定

<引用文献>

- 1) “知能システム応用を拓くコンピューティング技術”～外科手術支援システム，子どもの発達を科学する情報処理システム，組み込みアクセラレーションを実現するFPGAなど～，張山昌論，みやぎ組込み産業振興協議会，基調講演(2019-06-13，仙台市)
- 2) “計算科学・ビッグデータの医学生物学研究への応用～幼少期の行動解析から肝臓の切除部位の決定まで～”，張山昌論，招待講演，DOHaD 寺子屋研究会(2019-01-26，早稲田大学，西早稲田キャンパス)
- 3) “肝臓外科手術における体積制約下での最適切除領域推定” 電子情報通信学会 医用画像研究会，張山昌論・渡部椰也，下田貢(2017-07-06，東北大学さくらホール)
- 4) “A System for Estimating Optimal Resected Liver Regions Considering Practical Surgical Constraints”，Yaya Watanabe, Masanori Hariyama, Mitsugi Shimoda, International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS 2018), pp.415-420, (2018-11-28, Ishigaki, Japan)
- 5) “Development of new software enabling automatic identification of the optimal anatomical liver resectable region, incorporating preoperative liver function”, Mitsugi Shimoda, Masanori Hariyama, Yukio Oshiro, Shuji Suzuki, Oncology Letters, Vol. 18, Issue 6, pp.6639-6647, DOI:https://doi.org/10.3892/ol.2019.11006(2019-10-18)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 大城 幸雄, 下田 貢, 鈴木 修司, 北原 格, 矢野 博明	4. 巻 37
2. 論文標題 【VR(Virtual Reality)・AR(Augmented Reality)技術の最前線と医療応用】 肝シミュレーション・ナビゲーション手術(解説/特集)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 MEDICAL IMAGING TECHNOLOGY	6. 最初と最後の頁 28-34
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 下田 貢、張山 昌論、鈴木 修司
2. 発表標題 術前肝機能を考慮した最適肝切除領域自動抽出ソフトウェアの開発(会議録)
3. 学会等名 第118回日本外科学会定期学術集会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 下田 貢, 田子 友哉, 鈴木 和臣, 浅岡 純, 西田 清孝, 丸山 常彦, 島崎 二郎, 鈴木 修司
2. 発表標題 シミュレーション手術の新展開 超音波3D画像を用いた新たなナビゲーションシステムの構築
3. 学会等名 第79回日本臨床外科学会大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	張山 昌論 (Masanori Hariyama) (10292260)	東北大学・情報科学研究科・教授 (11301)	